

## 미세패턴 가공 시뮬레이션 기술 개발

이종민\*·송석균\*·최정주\*·본단\*·김수진†·이동윤\*\*·남성호\*\*·이석우\*\*·제태진\*\*\*

### Development of Micro Pattern Cutting Simulation Software

Jong-Min Lee, Seok-Gyun Song, Jeong-Ju Choi, Bondhan Novandy, Su-Jin Kim,  
Dong-Yoon Lee, Sung-Ho Nam and Seok-Woo Lee and Tae-Jin Je

**Key Words:** Machining Simulation(가공시뮬레이션), Virtual Turning(가상선삭), Micro Pattern(미세패턴), Micro Cutting(미세가공), Cutting Force(절삭력), Specific Cutting Energy(비절삭에너지), Roll Mold(롤금형)

#### Abstract

The micro pattern machining on the surface of wide mold is not easy to be simulated by conventional software. In this paper, a software is developed for micro patten cutting simulation. The 3d geometry of v-groove, rectangular groove, pyramid and pillar patterns are visualized by C++ and OpenGL library. The micro cutting force is also simulated for each pattern.

#### 기호설명

- a = Angle of cutter
- p = Pitch of pattern
- d = Depth of pattern
- w = Width of rectangular cutter
- $F_c$  = Cutting force of each path
- A = Area of cutting
- K = Specific cutting energy
- C = Constant (from experiment)
- n = Constant (from experiment)

#### 1. 서론

국제시장의 경쟁이 더욱 치열해지고 제품을 만들어 내는 것에 있어서 더욱 짧은 생산시간이 요구 되어가고 있는 현재의 상황에서 제품을 시뮬레이션 상에서 가상으로 제작해보는 것은 매우 큰 이점으로 작용하기 시작하였다. 그리하여 제품이 생산 전 이라도 제작 중에 발생할 수 있는 오차요인을 시뮬레이션으로 미리 발견하는 것이 주안점이 되었고, 시뮬레이션 프로그램에 통과 가공장비의 상태를 적용하여 최적의 장비 셋팅을 찾아내는 연구가 있었다.[1] 선반에서 가공 시뮬레이션을 사용하는 이유는 시간, 품질, 가격, 서비스적인 측면을 좀 더 효율적으로 사용하기 위해서이다. 시뮬레이션으로 NC코드에 의해 이상적으로 제작된 공작물과 동역학적, 열 변형, 절삭력에 의한 변형, 셋팅 에러 등 수많은 에러들을 종합하여 하나의 데이터로 종합하여 이것을 이상적 공작물의 데이터에 적용 그 차이를 해석 공작물의 작업 후의 상태를 예측하는 것이 가능하다 즉 발생 가능한 에러로부터 가공후의 공작물의 상태를 예측해보는 것이 가능한 것이다.[2] 경계표현법을 사용한 솔리드 모델링에서 특징 형상을

---

† 경상대학교 기계항공공학부  
E-mail : sujinkim@gnu.ac.kr  
TEL : (055)751-6075 FAX : (055)762-0227

\* 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 한국생산기술연구원

\*\*\* 한국기계연구원

---

적용하여 설계하고 치수를 쉽게 변경하는 연구가 있었다.[3] NC 밀링 시뮬레이션을 실시간으로 구현함에 있어 데이터의 실시간 처리를 위하여 LOD(Level-of-detail) 알고리즘을 적용하여 솔리드모델에서 실제 가공이 일어나는 부분을 사각평면 알고리즘과 병행하여 최적화하는 연구가 있었다.[4]

미세가공에서 절삭력은 공구마모, 절삭온도, 변형 등 가공오차에 가장 기초가 되는 물리적 현상으로 연구의 필요성이 있다. 절삭력 해석은 크게 절삭모델을 이용한 메카니즘 연구[5-7]와 FEM을 이용한 수치해석 연구[8]가 있었다.

하지만 위 시뮬레이션 방법과 일반적인 시뮬레이션 소프트웨어는 미터단위의 넓은 면적에 마이크로 단위의 미세패턴을 가공하는 대면적 미세패턴가공[9,10]의 시뮬레이션에 적합하지 않다. 따라서 넓은 면적에 마이크로미터 크기의 미세패턴을 가공할 때 3차원 형상과 물리적 절삭현상을 시뮬레이션할 수 있는 소프트웨어의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 대면적 미세가공 과정을 가공 전에 미리 시뮬레이션하는 기술을 개발해 가공과정과 결과를 미리 가상공간에서 관찰하고, 미세가공 중에 공구에 작용하는 절삭력을 예측하고자 한다.

## 2. 시뮬레이션 시스템 구조

### 2.1 기본 구조

본 연구의 주요 주안점은 룰 몰드 상의 반복된 패턴을 효율적으로 정확하게 표현하는 것에 있다. 그러기 위하여 그래픽은 OpenGL을 따르도록 하며 데이터 구조는 최대한 단순화를 위해 각 부품의 구현은 일반적인 B-Rep (Boundary Representation)의 구조를 따르도록 한다. 각 부품의 위치결정은 각각의 부품은 각자의 좌표계를 가지며 각부품의 기본좌표 원점에 의해 결정되게 된다.

### 2.2 부품의 형상 표현

이 연구에서 그래픽에 가시화하는 대상은 공구와 공작물 그리고 공작물 표면에 가공되는 미세패턴이다. 공작물의 기본 형태는 룰이며 직경 0.5m 길이 2.0m인 룰의 표면에 피치 20 $\mu$ m인 v

형 홈 전체를 삼각형 망으로 표현하려면 약 31\*10<sup>9</sup>개의 삼각형평면이 필요하다. 전체 미세패턴을 저장하는데 필요한 메모리는 2,000GB이고 이것을 모두 화면에 실시간으로 표현하는 것은 불가능하다. 이렇게 조밀한 삼각형 망으로 표현되는 모델을 실시간으로 가시화하기 위해 멀리 있는 형상은 데이터 크기를 줄이고 단순화해 표현하고 가까이 있는 형상은 자세히 표현하는 LOD 방법을 이용한다.[4] 즉 원거리에서 룰 전체 형상을 보여줄 때는 미세패턴을 제외한 원통형만을 표현하고 아주 가까이 확대했을 경우는 확대영역 안에 있는 미세패턴을 정밀하게 표현한다. 초정밀 미세가공품의 특징상 동일한 패턴의 반복됨으로 확대 영역을 자세히 표현할 때는 한번 계산된 형상을 연속적으로 배열해 가시화함으로써 메모리와 CPU 사용을 최소화 한다. 공구는 기본형태의 삼각형 형상을 지니도록 하며 최소한의 삼각형 스트립으로 이루어진다. 그리고 확대영역에서의 절삭 형태는 공구의 형태를 따르기 때문에 공구의 형태를 바꾸게 되면 확대 영역의 절삭 형태도 함께 변형되게 된다.

### 2.3 표현 구조

수치에 대한 정확한 표현이 필요하므로 표현 구조는 기하학적인 치수정보에 의거하여 표현되며 표현되는 대상은 공작물, 공구, 확대영역의 미세패턴이 있다.

#### 2.3.1 공작물

공작물인 룰 몰드에 대한 표현 구조는 B-Rep이며 원형 디스크와 원통으로 구성 된다. 원형 디스크는 원의 중심을 기준으로 하는 300개의 삼각면으로 이루어지며 원통의 표면은 600개의 삼각면으로 이루어져있다.

#### 2.3.2 공구

공구의 기본형상은 일반적인 형태의 공구 형태를 따르며 공구의 끝단은 삼각형 형상으로 이는 실제 다이아몬드 툴의 수치를 따른다.

#### 2.3.3 확대영역

확대영역의 표시 면적은 가로 세로 100 $\mu$ m의 면적을 표현 하도록 한다. 룰 몰드의 표면은 곡면이나 100 $\mu$ m\*100 $\mu$ m의 평면과 0.005 $\mu$ m 떨어져 있어 평면으로 간주 할 수 있다. 그리하여 확대영역은 곡면이 아닌 평면으로 표현하며, 확대영역에서 제거되는 소재는 공구의 형상과 동일

한 형상을 지닌다.

### 2.4 미세패턴 자료 구조

미세패턴을 단면 모양을 기준으로 크게 3가지로 분류하면 삼각단면, 사각단면, 일반단면으로 나누어진다. 또한 가공 방향으로 분류하면 일방향, 두방향, N방향으로 분류된다. 미세패턴의 자료구조는 앞의 분류와 C++ 클래스 특성을 Fig. 1과 같이 설계되었다.

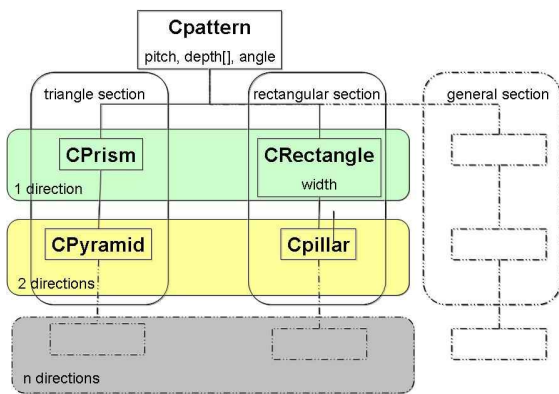


Fig. 1. Data structure of micro pattern

## 3. 미세가공 3D 형상 시뮬레이션

### 3.1 인서트

가공에 참여하는 날은 공구의 끝단에 붙어있는 다이아몬드 인서트로 Fig. 2는 인서트의 모양과 시뮬레이터에서 이용하고 있는 각 꼭지점의 고유번호를 보여준다. 각각의 고유번호로 이루어진 공구 끝단의 위치는 공구의 끝단에 위치한 원점으로 정의 되는 좌표계를 따르게 된다. 공구의 끝단의 위치에 관한 식은 Fig. 2의 꼭지점 2, 3은 좌표축의 원점인 꼭지점1의 좌표(0,0,0)에 인서트 크기 D와 공구각 a로 식(1)과 같이 계산된다. 이렇게 꼭지점 1, 2, 3으로 이루어진 하나의 삼각형이 만들어 지게 되면 이 삼각형의 기준점 1을 이동시켜 이동한 면적을 sweep volume 방식을 이용하여 하나의 솔리드로 표현하여 공구의 끝단을 생성하게 된다.

$$P_2\left(D\tan\left(\frac{a}{2}\right), D\right), P_3\left(-D\tan\left(\frac{a}{2}\right), D\right) \quad (1)$$

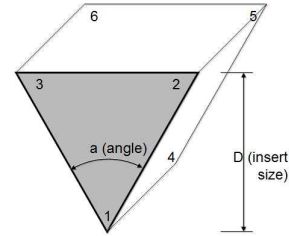


Fig. 2. Diamond insert model

### 3.2 프리즘 패턴

프리즘 패턴의 기본 요소는 Fig. 3과 같이 피치, 각도, 깊이의 세 가지 요소로 이루어진다. 절삭폭 식(2)가 피치보다 작을 경우에는 확대영역이 Fig. 4.(a)에서와 같이 소재의 윗면과 V홈이 함께 보이며, 절삭폭이 식(2)가 피치보다 커지게 되면 Fig. 4.(b)와 같이 프리즘 패턴의 형태가 된다.

Fig. 4.(b) 패턴의 위치 표현 방식은 Fig. 4.(a)에 사용하는 위치 표현을 그대로 이용할 경우 겹치는 부분이 발생하게 되어 올바른 표현이 되지 않으므로 식(2)가 피치보다 커질 경우에는 삼각형의 형상에는 변화가 없으며, 완전한 삼각형모양의 프리즘 패턴으로 표현하게 된다.

$$2d\tan\left(\frac{a}{2}\right) \quad (2)$$

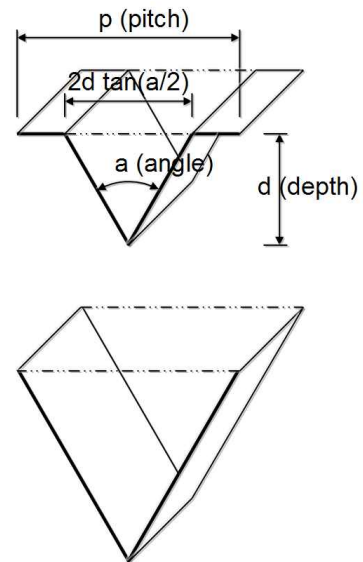
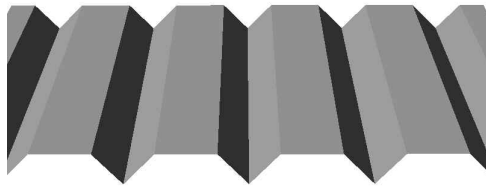


Fig. 3. Basic prism element



(a) Roughing step,  $2d \cdot \tan\left(\frac{a}{2}\right) < p$



(b) Finishing step,  $2d \cdot \tan\left(\frac{a}{2}\right) \geq p$

Fig. 4. Prism pattern

### 3.3 사각패턴

사각패턴의 기본요소는 피치, 각도, 깊이, 폭이다. Fig. 4.(b) 사각형 패턴은 삼각형과 매우 유사하나 폭이 존재하여 폭으로 인하여 발생하는 면의 정의가 필요하다. 기본 요소의 중앙에서 정의되는 사각단면 패턴은 각각 5개의 면 ㉠, ㉡, ㉢, ㉣, ㉤로 이루어지게 된다. 각각의 면은 4개의 점으로 이루어진 사각면으로 만들어지게 된다. 생성할 면의 수의 최소화를 위하여 삼각형이 아닌 사각형을 기본 요소로 만들게 된다. 각각의 면은 사각단면의 경계를 sweep volume 방식에 의해 생성된 면이다. 원소재로부터 ㉡, ㉢, ㉣로 이루어진 sweep volume을 제거 하였을 때 사각패턴 Fig. 6이 생성되게 된다.

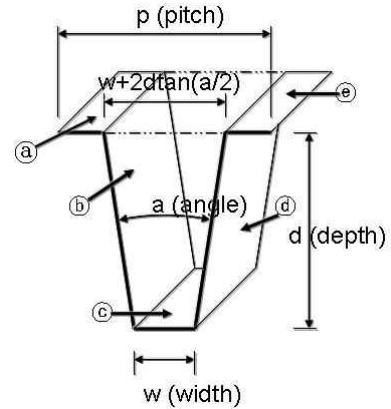
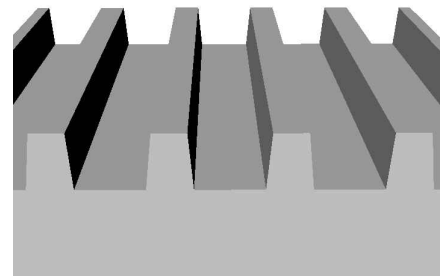
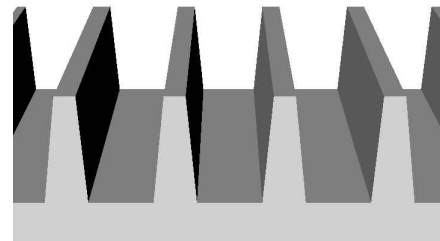


Fig. 5. Basic rectangular element



(a) Roughing step



(b) Finishing step

Fig. 6. Rectangular groove pattern

### 3.4 피라미드 패턴

피라미드 패턴의 기본적인 형태는 Fig. 3의 프리즘 패턴의 기본형상을 일방향에서 두방향으로 가공하여 생기는 형상을 시뮬레이션 상에 구현한 것이다. 완전한 피라미드 패턴이 생성되기 전의 모습은 Fig. 8의 (a)에서와 같이 보여지나 완전한 피라미드 패턴이 완성되게 되면 Fig. 8의 (b)와 같은 피라미드 패턴이 완성되게 된다.

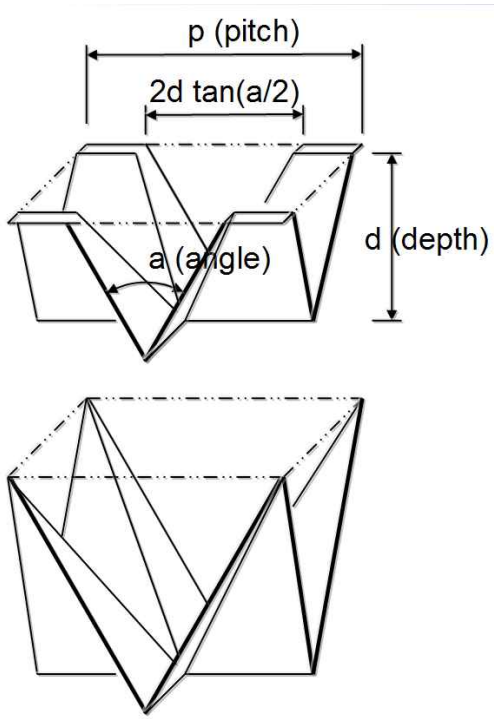
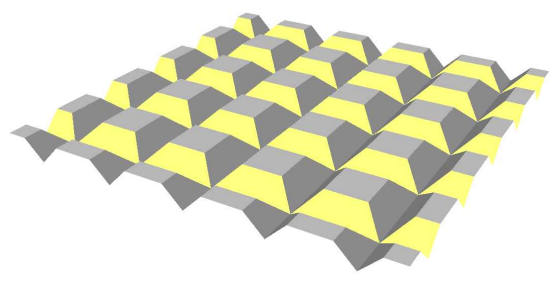
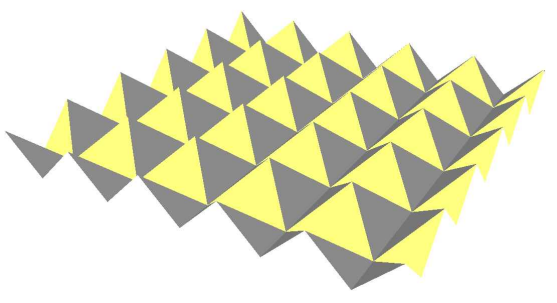


Fig. 7. Basic pyramid element



(a) Roughing step



(b) Finishing step

Fig. 8. Pyramid pattern

### 3.5 사각기둥 패턴

사각기둥 패턴 역시 Fig. 6의 사각패턴을 응용한 것이다. 사각패턴 형태의 기둥을 일방향가공

에서 서로 직교하게 두방향으로 가공할 경우 사각 기둥 형태의 패턴이 생성되게 되는데 그 기본 요소의 구성은 Fig. 9와 같다. 사각 기둥에서는 피라미드와 달리 피치가 항상 절삭폭보다 크게 유지 되도록 하는 것이 특징이다. 기본요소 Fig. 9를 피치 간격으로 배열하면 가공 결과 Fig. 10이 표현된다.

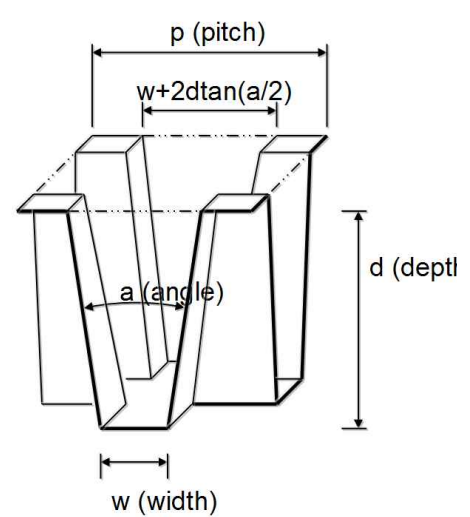
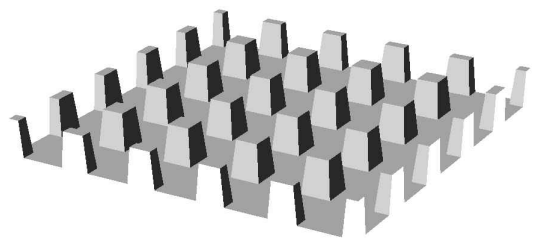
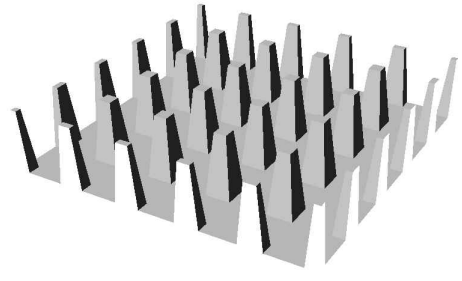


Fig. 9. Basic pillar element



(a) Roughing step



(b) Finishing step

Fig. 10. Pillar pattern

#### 4. 미세가공 절삭력 해석

##### 4.1 프리즘 패턴의 절삭력

기초적인 형상에 대한 시뮬레이션에 데이터를 기초한 절삭력에 대한 어플리케이션의 추가적인 구축이 가능하다. 공작기계에서 공작물의 절삭 시 발생하는 절삭력은 식(3)로 정의된다.[7] Fig. 11은 삼각 프리즘 패턴 절삭 시 발생하는 단면이다. 공작물의 가공 시 발생하는 절삭력  $F_c$ 는 절삭면의 면적과 비절삭에너지에 비례한다. 여기서 절삭면적은 Fig. 11에서 나타난바와 같이  $i$ 번째 절삭 깊이를 뜻하는  $d_i$ 와  $d_{i-1}$ 번째의 절삭면적의 차이에 의해 정의 된다. 절삭면적의 경우 두가지 경우가 발생하게 되는데 첫 번째 식(2)가 피치  $p$ 보다 작을 경우 즉 원소재의 윗면이 남아있는 경우에는  $i$ 번째 절삭면적은 식(4)으로 계산 된다. 두 번째 식(2)가 피치보다 큰 경우 즉 프리즘 패턴이 완성된 정상 단계의 경우 절삭되는 면적은 식(5)로 계산 된다.

$$F_c = KA \quad (3)$$

$$A_i = (d_i^2 - d_{i-1}^2) \tan\left(\frac{a}{2}\right) \quad (4)$$

$$A_i = (d_i - d_{i-1})P \quad (5)$$

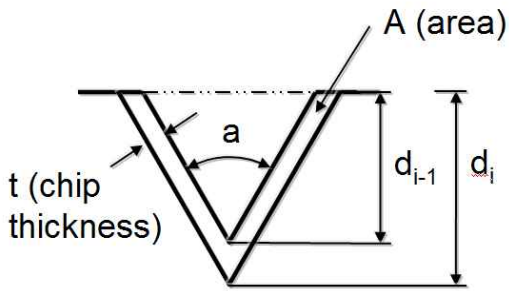


Fig. 11. Cutting area of prism pattern

비절삭에너지  $K$ 는 식(6)로 정의되며 여기서  $C$ 와  $n$ 은 실험적으로 그 값을 구하게 된다. 삼각 프리즘 패턴에서 6:4황동을 절삭할 경우에  $n=0.05$ 이며  $C=0.0018$ 로 예측된다.[11] 최종적인 절삭력  $F_c$ 는 원소재의 윗면이 남은 경우 식(7)로 이미 프리즘 패턴이 완성된 정상단계인 경우에는 식(8)로 계산된다.

$$K = Ct^{-n} \quad (6)$$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1}) \sin\left(\frac{a}{2}\right))^{-n} (d_i^2 - d_{i-1}^2) \tan\left(\frac{a}{2}\right) \text{ if } 2d \tan\left(\frac{a}{2}\right) < p \quad (7)$$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1}) \sin\left(\frac{a}{2}\right))^{-n} (d_i - d_{i-1}) p \text{ if } 2d \tan\left(\frac{a}{2}\right) \geq p \quad (8)$$

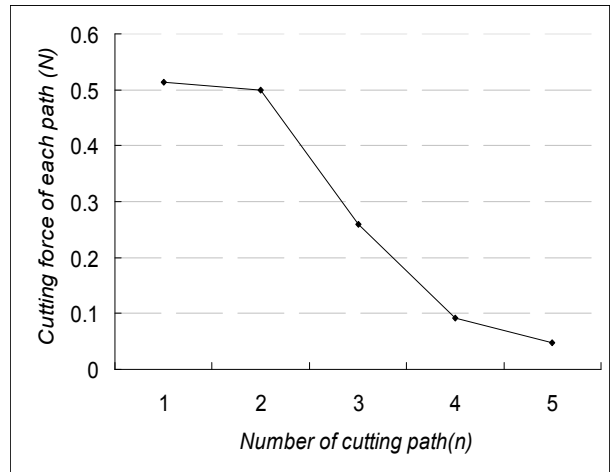


Fig. 12. Cutting force of prism pattern

##### 4.2 피라미드 패턴의 절삭력

피라미드 패턴의 절삭력은 프리즘 패턴의 절삭력에 파동 형태의 함수  $W_1(u)$ 가 곱하여 진 형태로 나타나게 된다. 피라미드 패턴의 절삭력은 식(9)로 나타나게 되며 여기서의  $F_c$ 는 프리즘 패턴의  $F_c$ 와 동일하다.

$$F_{cw} = F_c W_1(u) \quad (9)$$

피라미드 패턴의 절삭력은 Fig. 13에서처럼 일종의 파동을 형성하게 된다. 이 같은 파동의 Maximum force는 프리즘 패턴의  $d_i$ 번째 힘과 동일하며 Fig. 13과 같이 절삭력이 일정한 기울기를 가지면서 증가하였다가 최고점에서 동일한 기울기로 감소하게 된다. 피라미드 패턴의 두방향 절삭에서 일방향 절삭과 다른 점은 함수  $W_1(u)$ 의 존재 유무이다 절삭되는 면적이 일방향 절삭과는 다르게 변화가 존재하므로  $W_1(u)$ 는 그 변화를 절삭력에 포함시켜주는 역할을 하게 된다. 피라미드 패턴의 경우  $W_1(u)$ 은 두 가지로 표현된다. 원 소재의 윗면이 아직 남아있는 경우 식(10)과

같이 증가해 식(11)과 같이 일정한 값을 유지한 후 식(10)과 동일한 기울기로 감소하게 된다. 피라미드 패턴이 완성된 정상단계에서는 식(12)와 같이 증가했다가 같은 기울기로 감소하게 된다.

$$W_1(u) = \frac{|u|}{d \tan(\frac{a}{2})} \quad \text{if } 2d \tan(\frac{a}{2}) < p$$

$$\& \quad |u| < d \tan(\frac{a}{2}) \quad (10)$$

$$W_1(u) = 1 \quad \text{if } 2d \tan(\frac{a}{2}) < p$$

$$\& \quad |u| \geq d \tan(\frac{a}{2}) \quad (11)$$

$$W_1(u) = 2 \frac{|u|}{p} \quad \text{if } 2d \tan(\frac{a}{2}) \geq p \quad (12)$$

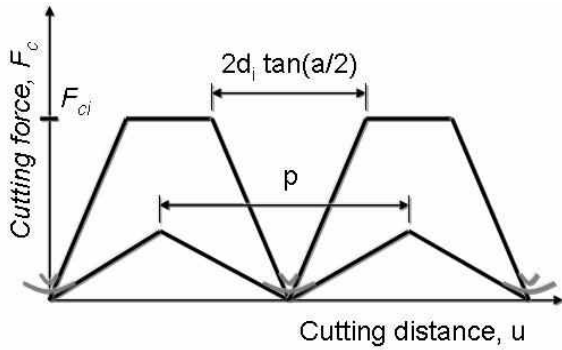


Fig. 13. Cutting force of pyramid pattern

### 5.3 사각 패턴의 절삭력

Fig. 14와 같은 사각 패턴의 절삭력은 크게 두 개의 힘으로 나누어 계산을 하고 있다. 식 (13)과 같이 공구의 옆면에 의하여 발생하는 절삭력과 공구의 아랫면에 의하여 발생하는 절삭력으로 나누어 계산하는 이유는 공구의 옆면에서 발생하는 칩의 두께와 공구의 아랫면에서 발생하는 칩의 두께 사이의 차이로 인해 측면의 비절삭에너지 상대적으로 크기 때문이다. 공구의 옆면에 의해 발생하는 절삭면적  $A_{si}$ 는 식(14)로 칩의 두께는 식(15)으로 계산되고, 공구의 아래쪽에서 발생하는 절삭면적  $A_{bi}$ 는 식(16)으로 이때의 칩의 두께는 식(17)으로 계산된다. 최종적으로 유도되는 사각패턴 가공의 절삭력은 식(18)로 계산된다.

Fig. 15는 사각패턴 가공에서 각도:5.72°, 피치:150 μm, 폭:120 μm, 1회당 절삭 깊이는 15\*10회+12+10 +8+5+3+1(μm)로 16회에 걸쳐 절삭하

는 경우[11] 각 가공 단계마다 식(18)로 예측된 절삭력 그래프이다. 여기에서 상수 C와 n은 실험에서 얻은  $C=0.0029$ ,  $n=0.35$ 를 사용했다.

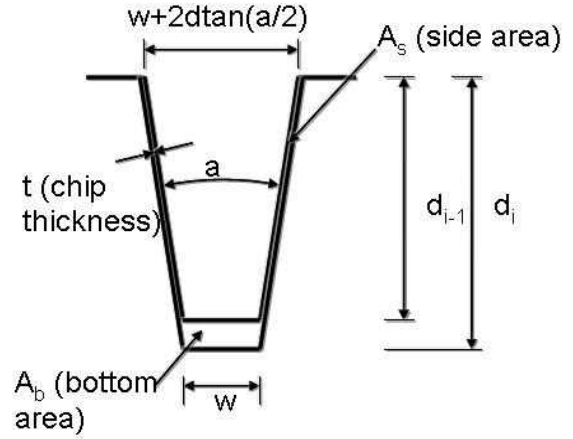


Fig. 14 Cutting area of rectangular section

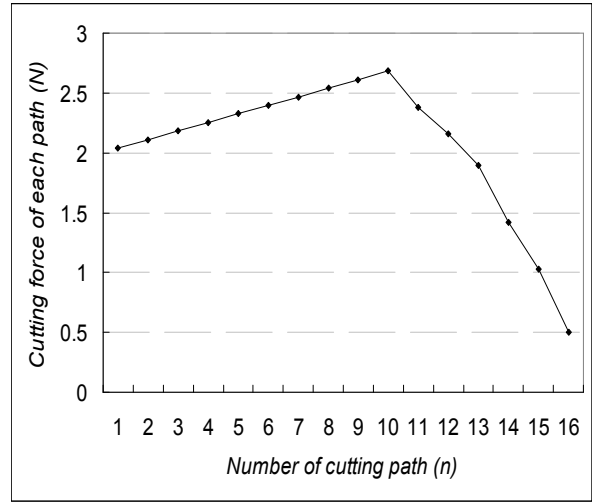


Fig. 15. Cutting force of rectangular pattern

$$F_c = Ct_{si}^{-n} A_{si} + Ct_{bi}^{-n} A_{bi} \quad (13)$$

$$A_{si} = 2d_{i-1} (d_i - d_{i-1}) \tan(\frac{a}{2}) \quad (14)$$

$$t_{si} = (d_i - d_{i-1}) \sin(\frac{a}{2}) \quad (15)$$

$$A_{bi} = (W + (d_i - d_{i-1}) \tan(\frac{a}{2})) (d_i - d_{i-1}) \quad (16)$$

$$t_{bi} = d_i - d_{i-1} \quad (17)$$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin(\frac{a}{2}))^{-n}2d_{i-1} \quad (18)$$

$$(d_i - d_{i-1})\tan(\frac{a}{2}) + C(d_i - d_{i-1})^{-n}$$

$$(w + (d_i - d_{i-1})\tan(\frac{a}{2}))(d_i - d_{i-1})$$

#### 4.4 사각기둥 패턴의 절삭력

사각기둥 패턴은 사각패턴의 응용된 형태로서 사각패턴을 두방향으로 절삭하였을 경우 생성되는 형태다. 동일한 형상을 두방향으로 절삭하여 만드는 패턴이므로 그 특징상 피라미드 패턴과 동일하게 함수  $W_2(u)$ 가 발생하게 되며 함수  $W_2(u)$ 는 사다리꼴 패턴을 생성하며 진행하게 된다. 절삭력은 피라미드 패턴의 경우에서와 같이 함수  $W_2(u)$ 에 의존적이게 된다. 절삭력의 최대값은 사각패턴의 절삭에서 구해진  $F_c$  와 동일한 값을 가지며 최소값은 0에 가까운 값을 가지게 된다. 함수  $W_2(u)$ 의 정의는 절삭 거리인  $u$ 에 의해 식(19), 식(20), 식(21)로 변하게 된다. Fig. 16은 사각 기둥 패턴을 가공할 때 발생하는 절삭력 형태를 보여준다.

$$W_2(u)=0 \text{ if } |u| < \frac{w}{2} \quad (19)$$

$$W_2(u) = \frac{|u| - \frac{w}{2}}{d \tan \frac{a}{2}} \text{ if } \frac{w}{2} \leq |u| < \frac{w}{2} + w + 2d_i \tan \frac{a}{2} \quad (20)$$

$$W_2(u)=1 \text{ if } |u| \geq \frac{w}{2} + w + 2d_i \tan \frac{a}{2} \quad (21)$$

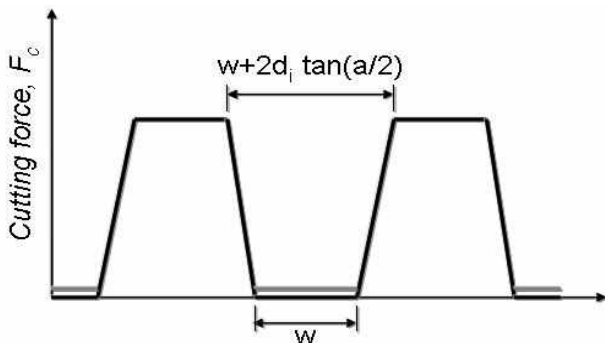


Fig. 16. Cutting force of pillar pattern

## 5. 결론

본 연구에서는 대면적 미세패턴 가공의 3D 형상 가공 시뮬레이션과 절삭력을 해석하는 알고리즘을 구현한다. 기존의 시뮬레이터와 다른 점은 미터 단위의 대면적에 마이크로 미터 크기의 미세형상이 가공되는 상황에 특화되고 최적화 되었다는 것이다. 이를 위해 기본요소를 계산하고 이것을 배열하여 확대 영역 안의 패턴을 가시화하는 방법을 이용하였다. 시뮬레이션으로 계산된 절삭단면적과 실험으로 계산된 비절삭에너지를 이용해 미세절삭력을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인했다.

구현된 미세가공 시뮬레이션 소프트웨어의 효과는 다음과 같다. 현재 육안으로 관찰되지 않는 가공형상 및 가공후의 제품을 가공 전 미리 보여줌으로써 현장 작업자에게 도움을 주고 제품의 생산을 도와줄 수 있도록 하고 있다. 공작물을 절삭하는 과정에서 절삭력을 시뮬레이션 상으로 측정하여 실제 절삭력을 예측하여 사용자의 편의를 도와 줄 수 있도록 하고 있다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부 전략기술개발사업의 지원에 의해 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) J.G.Li, W.B.Lee, Y.X.Yao, C.F.Cheung, S.To, 2005, "Workpiece representation for virtual turning", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 25, pp. 857~866
- (2) Yingxue Yao, Hang Zhao, Jianguang Li, Zhejun Yuan, 2006, "Modeling of virtual workpiece with machining errors representation in turning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172, pp. 437~444
- (3) 변문현, 오익수, 1996, "경계 표현법을 기반으로 한 특징 형상 모델러에서 치수 정보의 표현에 관한 연구", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 1, No. 2, pp. 122~132.
- (4) S.Q.Liu, S.K.Ong, Y.P.Chen, A.Y.C.Nee, 2006, "Real-time dynamic level-of-detail management for three-axis NC milling simulation", Computer-Aided



Design, Vol. 38, pp. 378~391

(5) C. Arcona, Th. A. Dow, 1998, "An Empirical Tool Force Model for Precision Machining", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of th ASME, Vol. 120, pp. 700-707

(6) P. J. Cheng, J. T. Tsay, S. C. Lin, 1997, "A Study on Instantaneous Cutting Force Coefficients in Face Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 10, pp. 1393-1408

(7) Xinmin Lai, Hongtao Li, Chengfeng Li, Zhongqin Lin, Jun Ni, 2007, "Modelling and analysis of micro ccsle milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.48, pp.1-14

(8) Kai Liu, 2005, "Process Modeling of Micro-Cutting Including Strain Gradient Effects", Georgia Institute of Technology, PhD Thesis

(9) 이응숙, 신영재, 강제훈, 채태진, 이재경, 이현용, 2000, "미세급형 제작을 위한 가공기술개발", 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1047~1050

(10) 이재경, 이응숙, 채태진, 심충진, 조동우, 고태조, 1992, "초정밀 경면 절삭가공 기술개발", 과학기술처 최종보고서

(11) 채태진, 박경택, 김재구, 이강원, 2008, "고품위 대면적 평판 미세 가공기술 개발", 제1회 대면적미세 가공 시스템 기술개발 Workshop, April 24-25, Jeju, Korea